



BETONARME KİRİŞİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ SONLU ELEMENLAR PROGRAMI İLE İNCELENMESİ

Hale Ergün¹, Pınar Özdemir Çağlayan¹ ve Kıvanç Kocacık¹
¹İTÜ İnşaat Müh. Böl. Uygulamalı Mekanik Birimi, İstanbul

ABSTRACT

In order to understand the behavior of the structural elements, necessity of experiment is unquestionable, but it is useful to decrease the number of experiments to the number of calibration experiments and then continue to analyze the problem with finite element models. The finite element solid65, offered for concrete in Ansys, that has nonlinear behavior and cracking and crushing capabilities used extensively in literature is used in this study. The four point bending experiment of the reinforced concrete beam, published by Buckhouse (1997) and modelled by Wolanski (2004) using user interface of Ansys and another prestressed concrete beam are analyzed by preparing command files for Ansys 18.0. Modelling by using command files has advantages with respect to occupying small space in computer and allowing all commands those may not be accessed by user interface. During solution of the nonlinear problem through the Newton-Raphson numerical solution method, the convergence problem encountered after the first crack of the concrete and its solution are discussed. Experiment, theoretical and the finite element program results are presented through comparison.

ÖZET

Yapısal elemanların davranışının incelenmesi için deneylerin gerekliliği tartışılmazdır, fakat, deney sayısının, sadece kalibrasyon için gerekli olan kadar azaltılıp, araştırmanın devamında sonlu elemanlar programlarının kullanılması faydalıdır. Bu çalışmada, literatürde geniş ölçüde kullanılan Ansys sonlu elemanlar programının, beton malzemesi için geliştirilmiş olan çekme ve basınç altında kırıldıktan sonra doğrusal olmayan yük taşıma özelliğine sahip solid65 elemanı kullanılmıştır. Wolanski (2004) nin Ansys arayüzünü kullanarak modellediği, Buckhouse'un 1997 yılında yayınlamış olduğu betonarme kirişe ait ve bir halat ile öngerme verilmiş olan betonarme kirişe ait dört nokta eğilme testleri, Ansys 18.0 programı için komut dosyaları hazırlanarak çözülmüştür. Komut dosyası hazırlayarak model oluşturmanın, az yer kaplaması ve arayüzde bulunmayan her komutun kullanılabilmesi açısından avantajları bulunmaktadır. Newton-Raphson yöntemi ile doğrusal olmayan problemin çözümü sırasında, betonda ilk çatlağın meydana geldiği noktadan sonra karşılaşılan yakınsama problemi ve çözümü tartışılmıştır. Deney, teorik ve sonlu eleman programı sonuçları karşılaştırılarak sunulmuştur.

GİRİŞ

Yapısal elemanların davranışlarının incelenmesi için, laboratuvarında deneylerinin yapılması şüphesiz en gerçekçi sonuçları sağlayacaktır. Fakat bu deneylerin yapılması uzun zaman

almakta, laboratuarda yer kaplamakta ve pahalıya mal olmaktadır. Deney sayısını azaltmak için, sonlu elemanlar programı ile kalibre edebilmek için gereken deneyleri yapmak ve daha sonra, davranışa etkisi incelenmek istenen parametreler belirlenerek, sonlu elemanlar modeli üzerinde istenilen sayıda deneyleri yapmak çok kolay olacaktır.

Literatürde betonarme için çok sayıda uygulaması olduğu için ANSYS sonlu elemanlar programı tercih edilmiştir [1-8]. Programın kalibrasyonu için, Buckhouse'un [1] çalışmasındaki boyuna ve etriye takviyeli betonarme kirişe ait dört nokta eğilme testi seçilmiş, deney kayıtları ile sonlu eleman sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha sonra aynı geometriye sahip, fakat boyuna donatı yerine bir halat ile öngerme verilmiş betonarme kirişin dört nokta eğilme yüklemesi modellenmiştir.

ANSYS 18.0'ın eğitim sürümü, düğüm noktası (nod) sayısı en fazla 32000 olan modeli çözmeye izin vermektedir. Bu çalışmada, iki eksene göre simetri kullanılarak kurulan modeller, 5160 adet nod ve 4107 elemandan oluştuğu için eğitim sürümü bu modelleri çözmek için yeterli olmuştur.

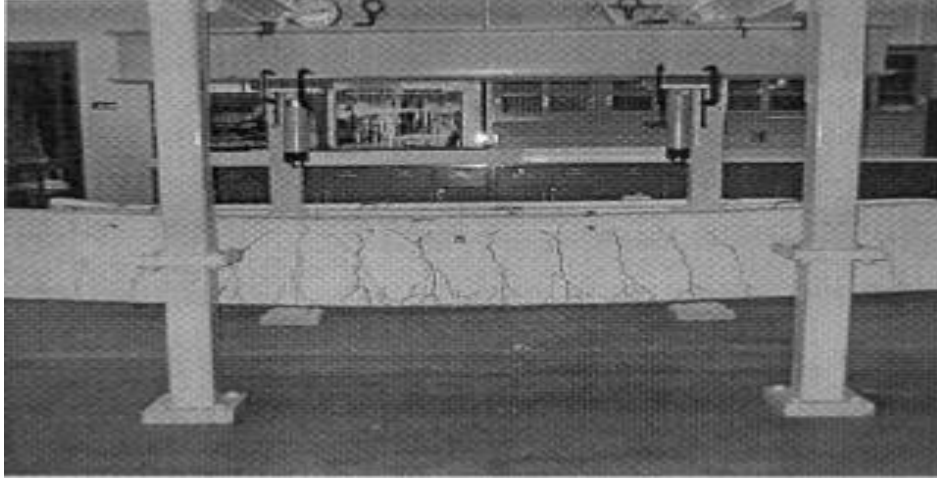
ANSYS programı ile modelleme üç şekilde yapılabilmektedir. Birincisi, kullanıcının görsel olarak modeli takip edebildiği bir ara yüzey programı (GUI: graphical user interface) ile uygulanmaktadır. İkinci yöntem ise komut satırına tek tek komutların verilmesi ile, üçüncü yöntem ise, bir text dosyasına komutların sırasıyla yazıldıktan sonra bu dosyanın ANSYS programına okutulmasıdır. Üçüncü durumda modelin saklanması için sadece text dosyasının kapladığı yer kilo bayt kadar yer tutmakta, yapılan bir yanlış komutun düzeltilmesi çok kolay olmakta ve ayrıca ara yüzey programının desteklemediği bazı komutları kullanma avantajı elde edilmektedir. Bu çalışmada, yapılan modellere ait text dosyaları hazırlanmıştır.

Fanning [2] çalışmasında, iki adet deney ve bunların sonlu eleman modellerini sunmuştur. İlki, boyuna ve etriye donatılı betonarme bir kirişin dört nokta eğilme testi, ikincisi ise, T kesitli, donatılı ve üç adet kablo ile öngerme verilmiş kirişe aittir. Her iki simülasyonda, deneylerde kaydedilen lineer olmayan davranış ve kırılma modları başarı ile yakalanmıştır. Wolanski [3], donatılı ve öngermeli betonarme kirişin davranışını incelediği tezinde, Buckhouse'un [1] deneyinin sonlu elemanlar modelini sunmuştur. Kachlakev ve ark. [4], raporlarında, lifle kuvvetlendirilmiş polimer takviyeli betonarme kirişleri modellemişlerdir. ANSYS programının, lineer olmayan problemleri çözmek için kullandığı Newton-Raphson yönteminde varsayılan (default) yakınsaklık kriterleri, betonun ilk kırıldığı yük değerinde yeterli olmamakta ve program çözümü durdurmaktadır. Bu çalışmalarda, bu problemin aşılması için çözüm aşamasında yakınsaklık kriterlerinde yapılması gereken değişiklikleri detayları ile paylaşmışlardır. Dawari ve Vesmawala [5], betonarme kirişe ait modeli Ansys 12 ile simüle etmişlerdir. Gao ve ark. [6], karbon lifli polimer, çelik gibi malzemeler ile takviye edilmiş betonarme kirişlerin deneylerini yayınlamışlardır. Deney sonuçları ve Ansys model sonuçlarının karşılaştırıldığı çalışmalarında uyumlu sonuçlar olduğu görülmektedir.

Günümüzde kullanılan sonlu eleman programları her yeni versiyonu ile birlikte, sunduğu elemanların teknolojilerinde, isimlerinde değişiklikler yapmakta veya bazen bazı elemanları tamamen kullanımdan kaldırabilmektedirler. Yukarıda seçilen Buckhouse [1] un sunduğu deneyin, ANSYS (SAS 2003) sonlu elemanlar programı ile modelini Wolanski [3] tezinde sunmuştur. Bu çalışma ile gerekli değişiklikler belirlenerek güncel modeller oluşturulmuş ve kazanılan bilgi ve deneyim ile birlikte, ileride çalışmayı planladığımız ard germeli kirişlerin davranışı için bir dayanak teşkil edilmiştir.

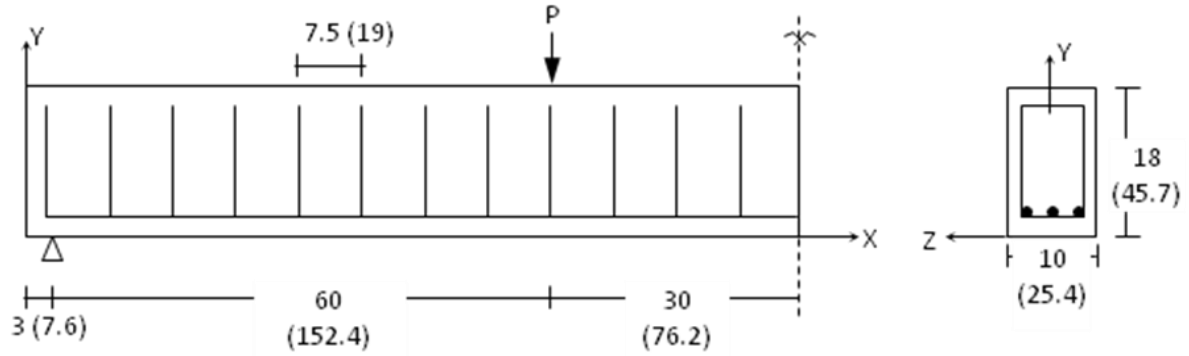
PROBLEMİN TANIMI

Şekil 1'de görülen Buckhouse'un çalışmasında [1] yer alan dört nokta eğilme deneyi bu çalışmada modelin kalibrasyonu için kullanılmak üzere seçilmiştir.



Şekil 1. Betonarme kiriş deney düzeneği [1].

Deney numunesi betonarme kiriş, 186 in (4.72 m) boyunda ve genişliği 10 in (25.4 cm), yüksekliği 18 in (45.7 cm) olan kesite sahiptir. Her iki ucundan 3 in (7.6 cm) mesafelerde mesnetlere oturtularak basit mesnetli kiriş olarak davranması sağlanmıştır. Mesnetler arası mesafenin üçte biri olan noktalardan kırılana kadar iki noktada yükleme yapılmıştır. Yani yükler ve ayrıca mesnetler arasındaki mesafe 60 in (1.52 m) tir.

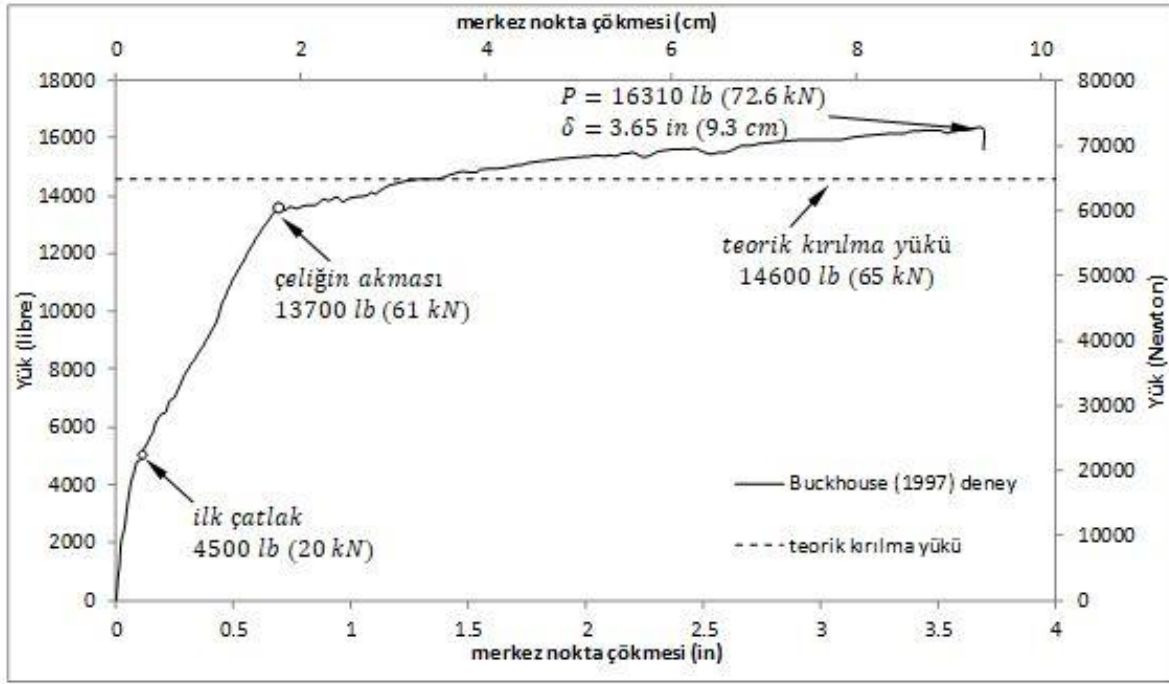


Şekil 2. Kiriş geometrisi ve kesiti (boyutlar in (cm) cinsinden verilmiştir).

Deney kirişinde paspayı her yerde 2 in (5.1 cm) tir. Şekil 2’de boyuna ve enine donatı gösterilmiştir. Kirişin altında herbirinin kesit alanı 0.31 in^2 (2 cm^2) olan boyuna donatılar üç adettir ($3\phi 16$). Herbirinin kesit alanı 0.11 in^2 (0.7 cm^2) olan toplam 25 adet etriye bulunmaktadır. Deney numunesinde kullanılan betonun 28 günlük basınç dayanımı 4770 psi (32.9 MPa) ve çeliğin akma gerilmesi 60 ksi (413.7 MPa) dir [3].

Göçene kadar yüklenen numunede, kirişin merkez orta noktasının çökmesine göre yük değişim grafiği Şekil 3’te verilmiştir [1]. Şekilde görüldüğü gibi, en büyük yük değeri 16 310 lbs (72.55 kN) ve ortalama orta eksen çökmesi 3.65 in (9.3 cm) olarak kaydedilmiştir. Deneyde ilk çatlağın 4 500 lbs (20.02 kN) yük değerinde olduğu ve kirişin betonun ezilmesi sonucunda göçtüğünü rapor etmiştir [1]. Şekil 3’te, ilk çatlağın oluştuğu noktaya kadar doğrusal, bundan sonra çeliğin aktığı değere kadar ikinci başka bir eğimle devam ettiği ve daha sonra göçene kadar doğrusal olmayan davranış gösterdiği görülmektedir.

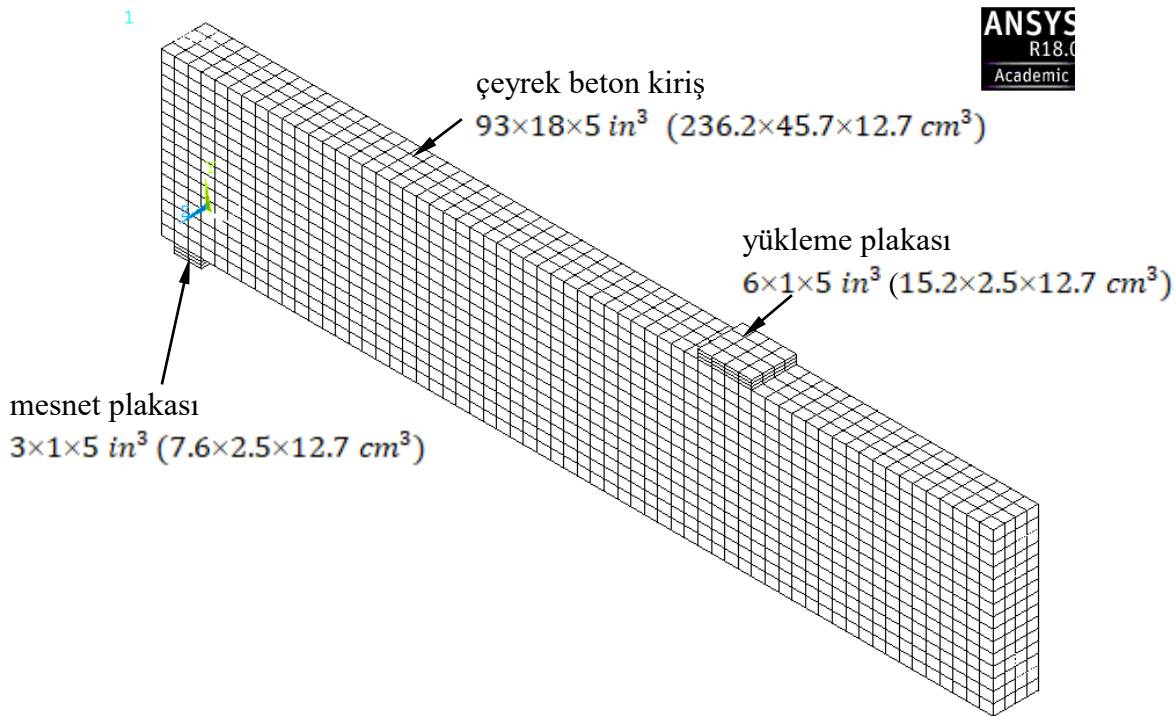
Yukarıda detayları verilen test, hazırlanan sonlu elemanlar modelinin kalibrasyonu için kullanılmıştır. Daha sonra, bu modelde boyuna donatılar kaldırılarak, yerine bir adet 0.46 in^2 (2.97 cm^2 , $\phi 10$) kesit alanı olan, 0.002 şekil değiştirme verilmiş halat yerleştirilmiştir. Bu öngermeli kirişte, ağırlık yükü göz önüne alındıktan sonra dört nokta eğilme testi uygulanmıştır.



Şekil 3. Betonarme kirişin yük-çökme grafiği [1].

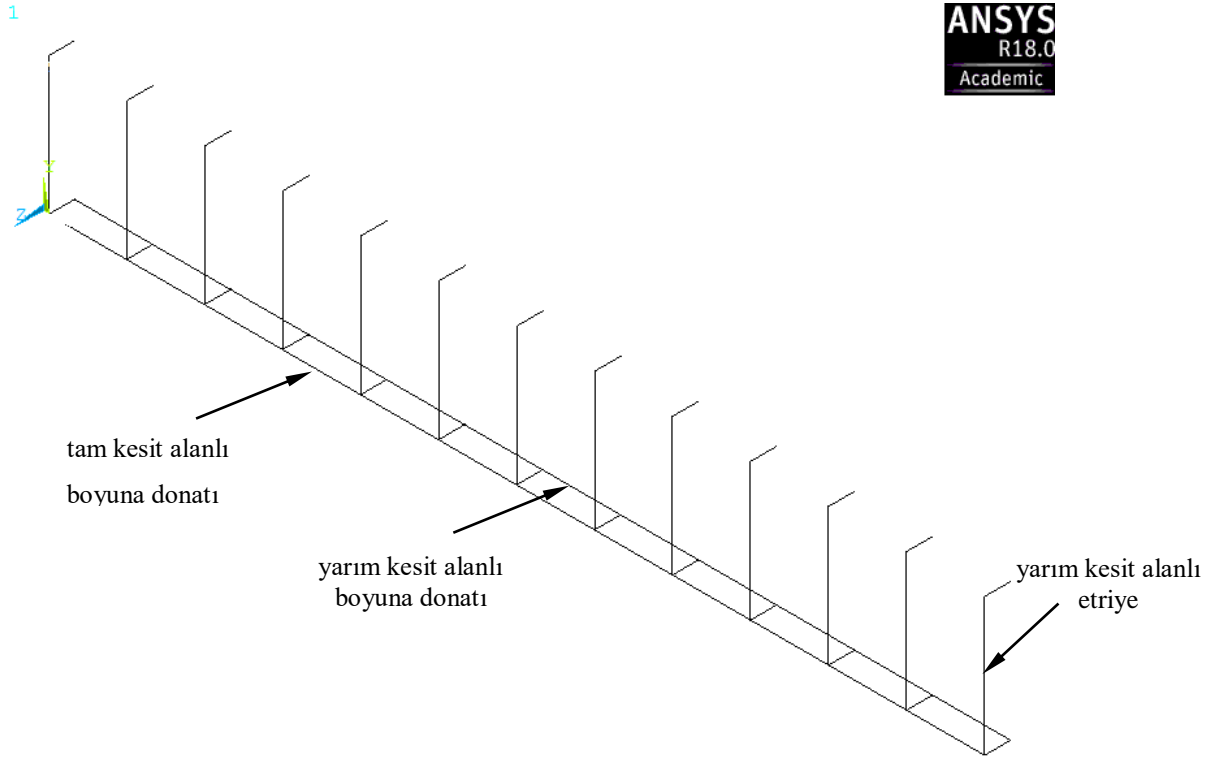
SONLU ELEMEN MODELİ

Şekil 4'te modelde kullanılan hacimler görülmektedir. Problem, kirişin tam orta noktasına göre, dik her iki düzlem boyunca simetrik olduğu için modelde kirişin dörtte biri göz önüne alınmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, genel koordinat sistemi kirişin sol orta noktasında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna göre, $z=0$ 'da xy -düzlemi boyuna ve $x=93$ in (2.4 m)'de yz -düzlemi enine simetri düzlemi olarak kullanılmıştır.



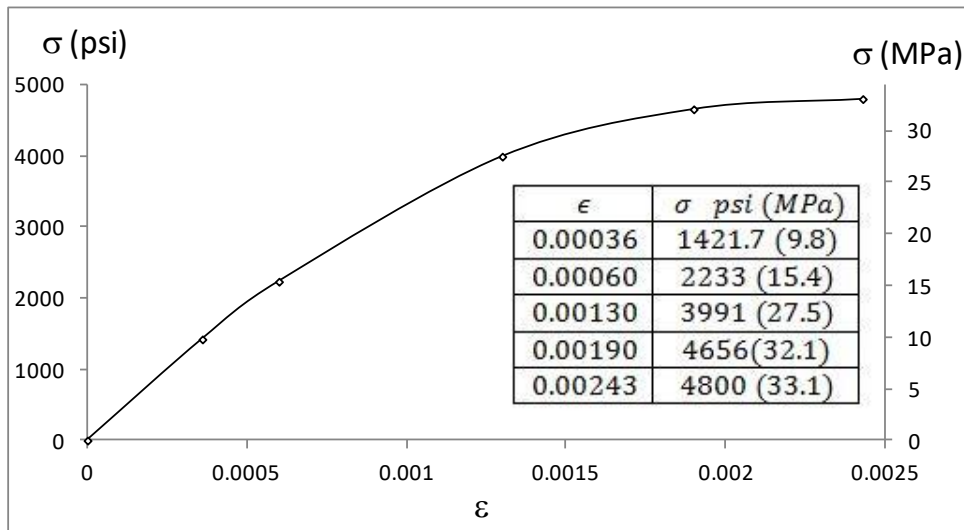
Şekil 4. Modelde oluşturulan hacimler, boyutları ve ağ (mesh).

Beton için Solid65, mesnet ve yükleme plakası için Solid185, donatılar için Link180 isimli ANSYS sonlu elemanları seçilmiştir. Şekil 5'te görülen donatı elemanları, daha önce yerleştirilmiş olan beton elemanlarının var olan düğüm noktaları aralarında tanımlanarak modele eklenmişlerdir. Buna göre, modellerde donatı ve/veya halatın, beton ile tam bağlı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 5. Ansys sonlu elemanlar modeli Link 180 elemanları.

Mesnet ve yükleme plakası (Solid185) için kullanılan lineer elastik malzemede Elastisite modülü $E=30 \cdot 10^6$ psi (207 GPa) dür. Beton (Solid65) için kullanılan Elastisite modülü $E=3949076$ psi (27228 MPa) olup doğrusal olmayan davranışını modellerken programda kullanılan gerilme-şekil değiştirme değerleri Şekil 6'daki grafikte verildiği gibidir. Bütün malzemeler için Poisson oranı 0.3 olarak kullanılmıştır.



Şekil 6. Beton için kullanılan gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Betonun çekmeden dolayı kırılma ve basınçtan dolayı göçme özellikleri programda TBDATA,,0.3,1,520,-1 komutu ile uygulanmıştır. Bu komutta kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

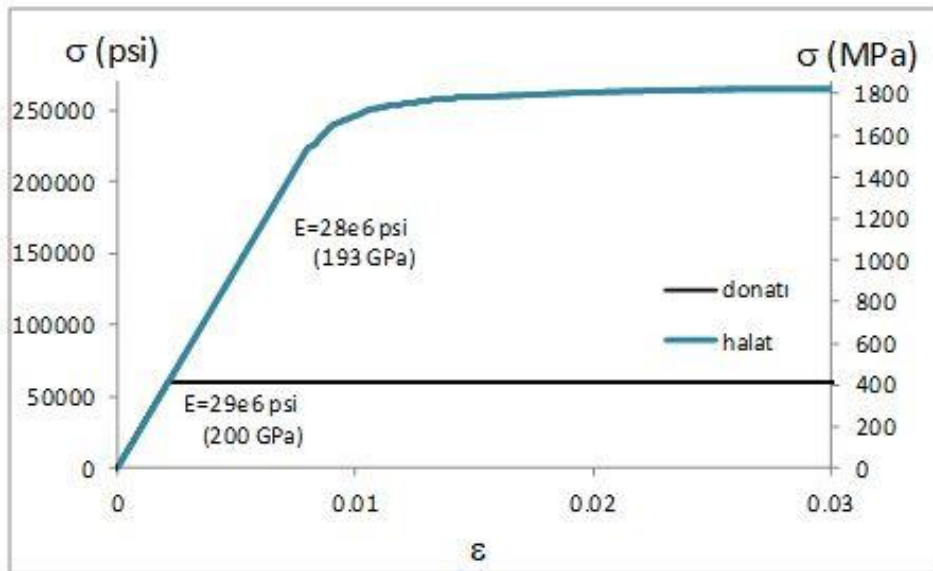
Çekme ve basınç altında kırık oluştuğunda kayma aktarım katsayıları 0 (yükün hiç aktarılmadığı durum) ile 1 (yükün tamamen aktarılması durumu) arasında verilebilmektedir. Fakat, Kachlakev ve ark. [4] ve Wolanski [3] ün de çalışmalarında belirttiği gibi, C_1 katsayısı 0.2 nin altında kullanıldığı zaman çözüm aşamasında yakınsaklık problemleri yaşanmaktadır. Aynı problem, basınç dayanımı göz önüne alındığında da yaşanmaktadır, bundan dolayı yukarıdaki çalışmacıların da önerisi doğrultusunda C_4 katsayısı -1 yazılarak, malzemenin basınç altında göçme özelliği kaldırılmıştır.

Çizelge 2. Betonun (Solid65) için kullanılan malzeme sabitleri.

C_1 : Çekme altındaki bir kırıkta kaymayı aktaran katsayı (β_t)	0.3
C_2 : Basınç altındaki bir kırıkta kaymayı aktaran katsayı (β_c)	1
C_3 : Eksenel çekme dayanımı (f_t)	520 psi (3.6 MPa)
C_4 : Eksenel basınç altında göçme dayanımı (f_c)	-1

Literatürde betonarme sonlu elemanlar ile modellenirken, ayrık (discrete), gömülü (embedded) ve homojen (smeared) olmak üzere üç farklı teknik kullanılmaktadır [2,3]. Fanning [2]’in çalışmasında önerdiği şekilde bu çalışmada ayrık model kullanılmıştır.

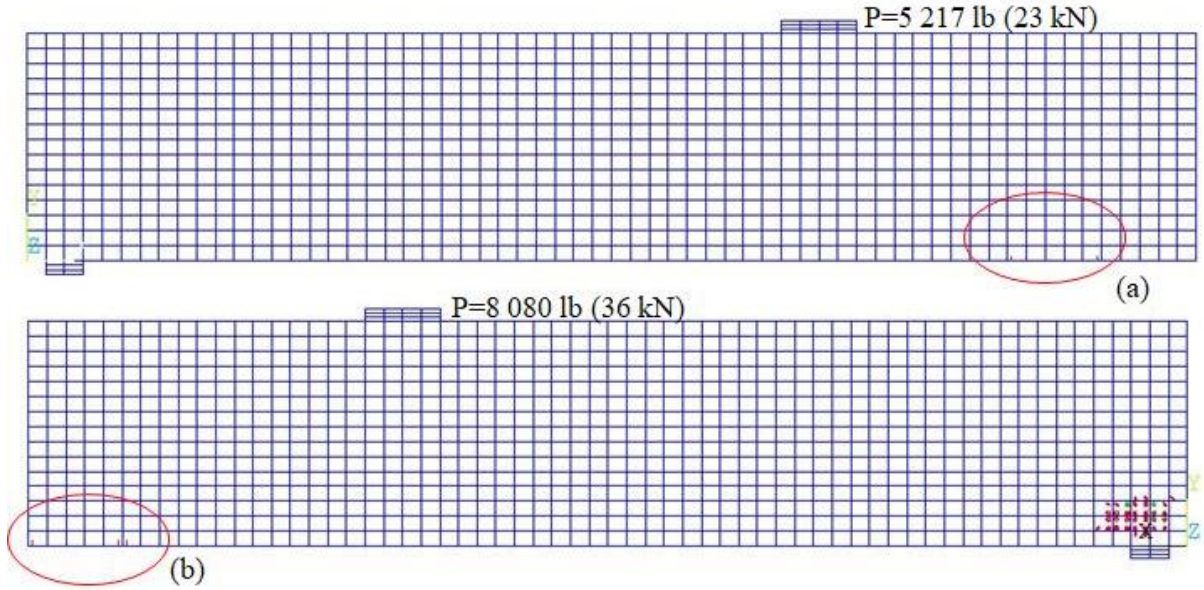
Kalibrasyon modelinde kullanılan donatılar (Link 180) için kullanılan çeliğe uygun bilineer malzeme sabitleri Elastisite modülü $E=29 \cdot 10^6$ psi (200 GPa), akma gerilmesi $\sigma_Y=6 \cdot 10^4$ psi (413.7 MPa), tanjant elastisite modülü 2900 psi (20 MPa) dır. Öngermeli kiriş modelinde kullanılan etriyeler ve halat için gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 7’deki gibidir. Öngermeli kiriş modelinde, ilk olarak halata 0.002 kadar şekil değiştirme, ikinci olarak kendi ağırlığı 0.0868 lb/in³ (24 kN/m³) ve son olarak dört nokta eğilme olmak üzere üç aşamada yükleme yapılmıştır.



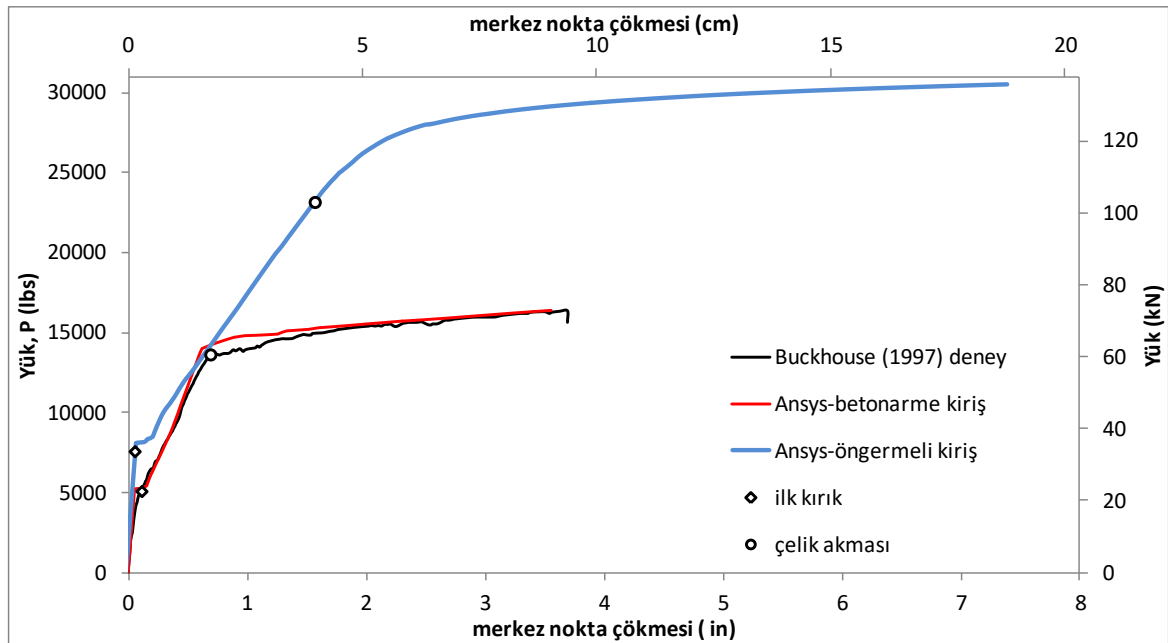
Şekil 7. Donatılar ve halat için kullanılan gerilme-şekil değiştirme değerleri.

SONUÇLAR

Teorik hesap ile kirişte ilk çatlağın 5117 lb (23.2 kN) yük değerinde meydana geleceği hesaplanabilir. Buckhouse [1] deneyde ilk çatlağı 4 500 lb (20 kN) yük değerinde gördüğünü rapor etmiştir. Wolanski [3] tezindeki Ansys modelinde ilk çatlağın 5216 lb (23.2 kN) yük değerinde meydana geldiğini söylemiştir. Bu çalışmada ilk çatlağın görüldüğü yük değerlerindeki kiriş resimleri Şekil 8’de görülmektedir. Kalibrasyon modelinde, ilk çatlaklar 5217.18 lb (23.2 kN) değerinde görülmüştür. Öngermeli kirişte, ilk çatlak (bursting) öngermeye yüklemesinde mesnetler üzerinde oluşmuş, daha sonra 8080 lb (36 kN) yük değerinde eğilme çatlakları gözlenmiştir.



Şekil 8. İlk eğilme çatlaklarının görüldüğü yük değerlerinde hasarlı kiriş resimleri (a) Kalibrasyon testi, P=5217.2 lb (23.2 kN), (b) Öngermeli kiriş testi, P=8080 lb (36 kN).



Şekil 9. Yük-yer değiştirme grafikleri.

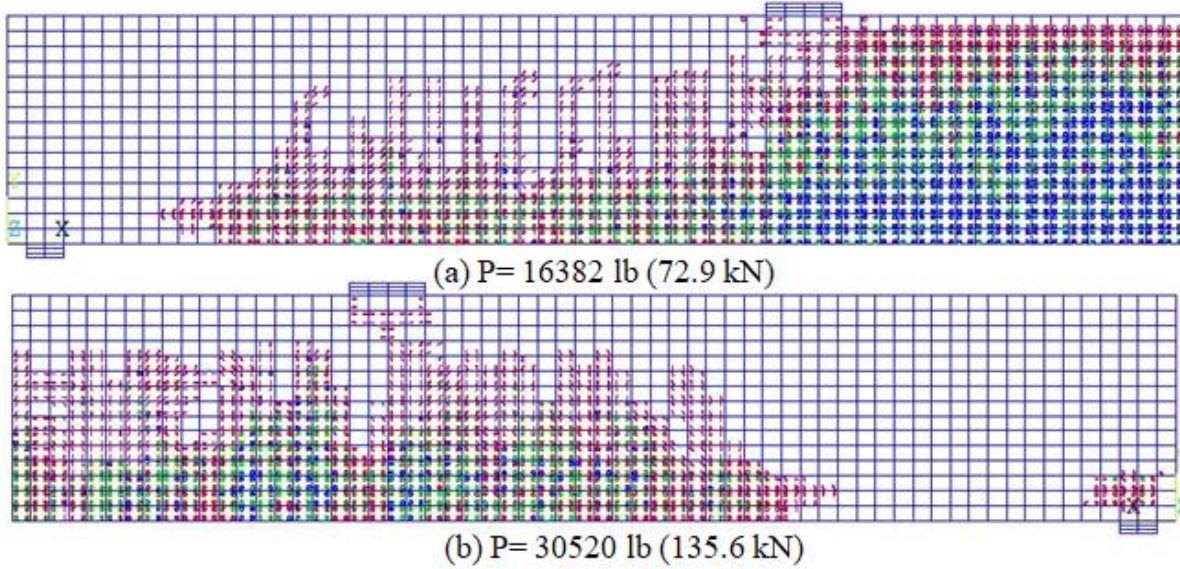
Şekil 9’da, kalibrasyon testinin ve öngermeli kirişin orta kesitinin çökmesine göre uygulanan yükün değişimini gösteren sayısal model sonuçları görülmektedir. Öngermeli kirişte göçme, kalibrasyon modeline göre yaklaşık iki misli yük ve yer değiştirme değerinde meydana gelmektedir.

İlk eğilme çatlağının görüldüğü ve kirişlerin göçtüğü yük ve çökme değerleri Çizelge 3’te tablo ile sunulmuştur. Deney verileri ile kalibrasyon modeli arasında yeterli uyum olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Deney ve sonlu eleman model sonuçları.

		Buckhouse [1] deney	Kalibrasyon modeli	Öngermeli kiriş modeli
İlk eğilme çatlağı	Yük, lbs (kN)	4500 (20.0)	5210 (23.2)	7538 (33.5)
	Çökme, in (cm)	0.08 (0.2)	0.05 (0.13)	0.06 (0.15)
Göçme	Yük, lbs (kN)	16310 (72.6)	16382 (72.9)	30520 (135.6)
	Çökme, in (cm)	3.65 (9.3)	3.56 (9.04)	7.4 (18.8)

Şekil 10’da, kalibrasyon testinin ve öngermeli kirişin göçme anındaki hasar durumları görülmektedir.



Şekil 10. Göçme anında hasarlı kiriş resimleri (a) Kalibrasyon testi, P=16382 lb (72.9 kN), (b) Öngermeli kiriş testi, P=30520 lb (135.6 kN).

Günümüzde kullanılan sonlu eleman programları her yeni versiyonu ile birlikte, sunduğu elemanların teknolojilerinde ve bazen bazı elemanlar tamamen kullanımdan kaldırabilmektedirler. Bu çalışmanın, güncel modelleme ve gereken değişikliklerin tespiti açısından betonarme elemanlar ile yapılacak olan güncel çalışmalarda faydalı olması amaçlanmıştır. Bu çalışma ile altyapısı kurulmuş olan modelleme genişletilerek, kiriş boyunca boşluk içerisinde ard germeli kirişin davranışının modellenmesi kolayca çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] E.R. Buckhouse, *External Flexural Reinforcement of Existing Reinforced Concrete Beams Using Bolted Channels*, Yüksek Lisans tezi, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1997.

- [2] P. Fanning, Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2 (2001) 111–119.
- [3] A.J. Wolanski, *Flexural Behavior of Reinforced and Prestressed concrete beams using finite element analysis*, Yüksek Lisans tezi, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, USA, 2004.
- [4] D.I. Kachlakev, T. Miller, S. Yim, T. Potisuk, *Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates*, Rapor no: SPR 316, California Polytechnic State University, 2001.
- [5] V.B. Dawari, G.R. Vesmawala, Application of nonlinear concrete model for finite element analysis of reinforced concrete beams, *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 5, 9 (2014) 776–782.
- [6] R. Gao, Q. Cao, Experimental study on flexural performance of reinforced performance of reinforced concrete beams subjected to different plate strengthening, *Composite Structures*, 176 (2017) 565–581. doi: [http:// dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.052](http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.052).
- [7] M.Y.H. Bangash, *Manual of Numerical Methods in Concrete*, Thomas Telford Publishing, Londra, 2001.
- [8] Ansys Academic Research, Mechanical APDL Release 18.0, referans dosyaları.